

Optoelect
2019

**XI Reunión Española
de Optoelectrónica**

3-5 de julio de 2019

Zaragoza



Instituto Universitario de Investigación
de Ingeniería de Aragón
Universidad Zaragoza



Universidad
Zaragoza

Multiplexado angular en almacenamiento holográfico de información sobre fotopolímero

Angular multiplexing in holographic data storage using photopolymers

Fco. Javier MARTÍNEZ-GUARDIOLA ^(1,2), Eva CALZADO ^(1,2), Andrés MÁRQUEZ ^(1,2), Sergi GALLEGÓ ^(1,2), Marta MORALES-VIDAL ⁽²⁾, Inmaculada PASCUAL ^(2,3), Augusto BELÉNDEZ ^(1,2)

1. Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal, Universidad de Alicante, Crta. San Vicent del Raspeig s/n.
2. Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías, Universidad de Alicante, Crta. San Vicent del Raspeig s/n
3. Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, Universidad de Alicante, Crta. San Vicent del Raspeig s/n.

Persona de contacto: F. J. Martínez-Guardiola (fj.martinez@ua.es).

RESUMEN:

En este trabajo queremos presentar una primera evaluación de los resultados obtenidos al usar el multiplexado angular en nuestro sistema de almacenamiento holográfico de información. Nuestro sistema presenta varias innovaciones que nos ayudarán a aumentar la densidad de datos almacenados en el material, una de ellas es el multiplexado angular. Para hacer uso de este multiplexado hay que tener en cuenta ciertas consideraciones que hacen referencia a la energía depositada en el material en cada página de datos, no sólo se busca no saturar el material en las sucesivas grabaciones, sino también es deseable que estas páginas tengan la misma visibilidad cuando sean reconstruidas. El ajuste de estos factores puede realizarse experimentalmente.

Palabras clave: Holografía, Almacenamiento Digital, Dispositivos de Cristal Líquido, Fotopolímero, PA-LCoS, Multiplexado Angular

ABSTRACT:

In this work we want to present first results evaluation obtained using angular multiplexing in our Holographic Data Storage System. Our system presents some innovations that will help us increase the stored data density in the material: one of them is the angular multiplexing.

To use this multiplexing technique we have to consider some limitations referred to the energy deposited in the material by each data page. We must not saturate the material in the sequential storing process, and we also want to obtain the same visibility for each page during the reconstruction process. These parameters can be obtained experimentally.

Key words: Holography, Data Storage, Liquid-Crystal devices, Photopolymer, PA-LCoS, Angular Multiplexing

1.- Introducción

El almacenamiento holográfico de información (HDS-Holographic Data Storage), es una tecnología muy prometedora desde la primera aparición de los láseres en los años

60 [1], si bien hay una gran cantidad de desafíos científicos e ingenieriles que hay que abordar, pero esta tecnología nos posibilitaría un verdadero almacenamiento en las 3 dimensiones del material, y además permite la búsqueda asociativa de información[2].

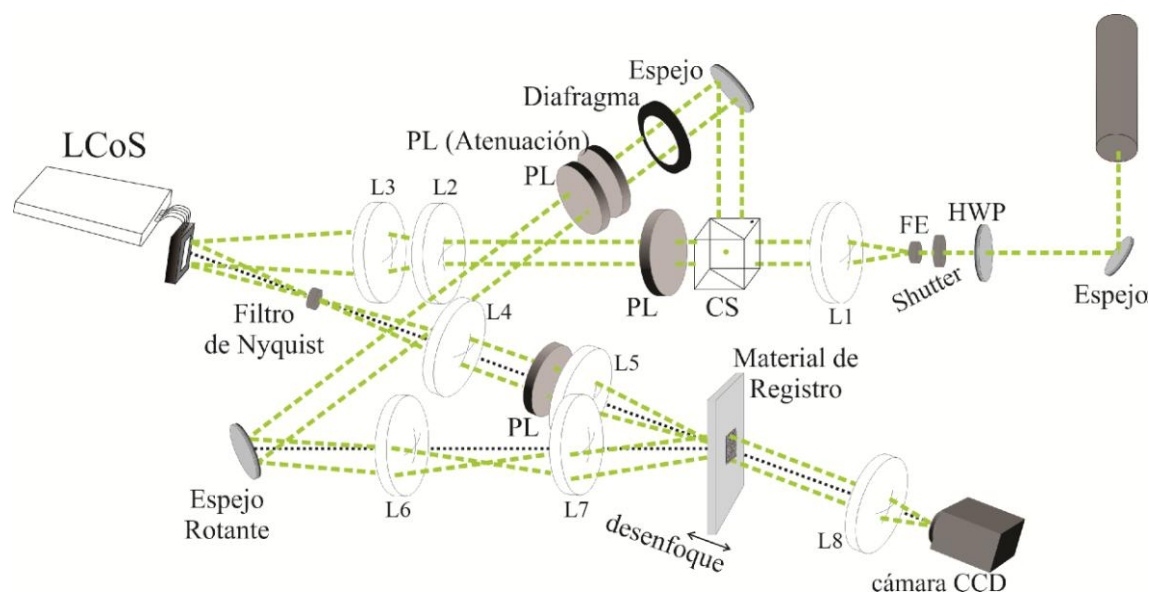


Fig. 1: Esquema del montaje experimental de nuestro sistema HDS.

En su corta historia han aparecido algunas plataformas de desarrollo y prototipos comerciales, cuya principal aplicación sería el almacenamiento de larga duración [3-6].

El desarrollo de este tipo de plataformas presenta diversos retos tecnológicos. En nuestro caso el montaje experimental recoge varias innovaciones interesantes. La primera y más notable es la incorporación como dispositivo de entrada de datos de un modulador espacial de luz (SLM-Spatial Light Modulator) basado en un dispositivo de cristal líquido de alineación paralela, PA-LCoS (Parallel Aligned-Liquid Crystal on Silicon), que nos ofrece una gran resolución y la capacidad de modular en fase sin tener una modulación en amplitud acoplada [7,8], característica que nos servirá para intentar cancelar el término DC al almacenar la transformada de Fourier de la página de datos [9].

La segunda innovación que incorpora nuestro montaje es una arquitectura basada en un correlador convergente en vez del tradicional sistema 4-f. Esto nos permite una mayor flexibilidad a la hora de diseñar nuestro montaje [9,10], ya que nos da flexibilidad a la hora de escoger las distintas distancias focales.

Por último, en el haz de referencia hemos introducido un sistema afocal donde un espe-

jo con capacidad de rotación está en el plano conjugado del material, lo que nos permite, con sólo rotar el espejo, realizar un multiplexado angular. En este trabajo nos queremos centrar en la parte de la multiplexación utilizando este sistema afocal y cómo conseguir que en las distintas páginas de datos se obtenga una respuesta similar por parte del material. Como es lógico esto estará afectado por el tipo de material, el tiempo de exposición y la energía depositada.

2.- Montaje experimental

Un sistema de almacenamiento holográfico de información, básicamente, es un interferómetro donde en el haz objeto, haciendo uso de una pantalla PA-LCoS, se introduce una imagen con los datos que se quieren almacenar en el material. De esta forma al iluminar sólo con el haz de referencia podremos reconstruir la imagen grabada.

El sistema experimental utilizado en nuestro laboratorio es el que se puede ver en la figura 1. En él utilizamos un haz proveniente de un láser Nd:YVO₄ de 532nm, longitud de onda de la sensibilidad del material. Entre el shutter y el filtro espacial (FE) se utiliza una lámina retardadora para asegurar que tenemos suficiente intensidad de luz atravesando los polarizadores tanto en el haz objeto como en el de referencia. Después de atravesar el

FE el haz es colimado mediante la lente L1, y mediante el cubo separador (CS) se crean el haz objeto y el haz de referencia. En el haz objeto vemos como con las lentes L2 y L3 se construye un haz convergente que es reflejado por el PA-LCoS, en el plano de convergencia del haz se produce la transformada de Fourier de la página de datos. En este mismo plano utilizamos una apertura (filtro de Nyquist), después mediante L4 y L5 se ha construido un sistema para trasladar el plano de la transformada de Fourier al plano del material de registro. En este punto me gustaría destacar que existe la posibilidad de introducir un pequeño desenfoque, con sólo variar ligeramente la posición de la lente L5, aunque este sistema no lo utilizamos en este estudio. Tampoco limitamos la extensión de la transformada de Fourier (dejamos abierto el filtro de Nyquist). Los polarizadores lineales que se encuentran en el haz objeto se utilizan para definir el esquema de modulación que utilizaremos para representar la información. En este haz sólo faltaría un polarizador lineal (que no se muestra en la figura, para seleccionar la modulación TEM y producir la interferencia con el haz de referencia.

En el haz de referencia, lo primero que encontramos son dos polarizadores para poder controlar la intensidad de este haz y de esta forma seleccionar la relación de potencia entre los dos haces, el polarizador de salida de este sistema (PL) selecciona la orientación vertical para realizar la interferencia con el haz objeto. Lo destacable de este haz, y que será importante para los datos que presentaremos en este trabajo, es el sistema formado por el espejo rotante, las lentes L6 y L7 y el plano del material. Este sistema afocal produce un haz de luz siempre en la misma posición del plano de registro, pero con distintos ángulo de incidencia. Este ángulo de incidencia dependerá del ángulo del espejo rotante, este espejo está montado sobre un etapa motorizada SR50CC de Newport, con una resolución angular de 0.001° , de esta forma podemos controlar con suficiente exactitud el ángulo entre el haz objeto y el haz de referencia en el plano del material. Hay que decir que el ángulo de separación inicial entre haz objeto y haz de referencia es de 37° , siendo una configuración simétrica,

que en el caso de dos ondas planas interfiriendo generaría una red holográfica de transmisión de 1193 líneas/mm. Esto queda dentro del rango caracterizado por nuestro grupo para los fotopolímeros PVA/AA [8]. En el proceso de reconstrucción, el material de registro es iluminado con el haz de referencia y con la lente L8 se genera la transformada de Fourier del plano de registro en la cámara CCD, utilizamos una pco.1600 de pco.imaging. Esta cámara tiene 14 bits de rango dinámico, está refrigerada y tiene una resolución de 1600×1200 píxeles, el tamaño del pixel es de $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}^2$.

3. Multiplexado angular

En este trabajo queremos explorar las limitaciones que tenemos en el multiplexado angular. Como se ha comentado este se lleva a cabo mediante el giro del espejo rotante y las lentes L6 y L7 de la figura 1. La primera limitación que encontramos es el ángulo máximo que somos capaces de girar sin que el haz salga de los límites de L6. De esta forma tenemos un rango de giro entre -5° y $+5^\circ$, ya que más allá el haz de referencia impacta en los bordes de L6.

Otra limitación viene de la formación de la imagen de la página de datos en la cámara CCD para recuperar la información. En este sentido y para que las páginas multiplexadas se separen lo suficiente entre sí en la reconstrucción, entre una página y otra hay que girar al menos 1° .

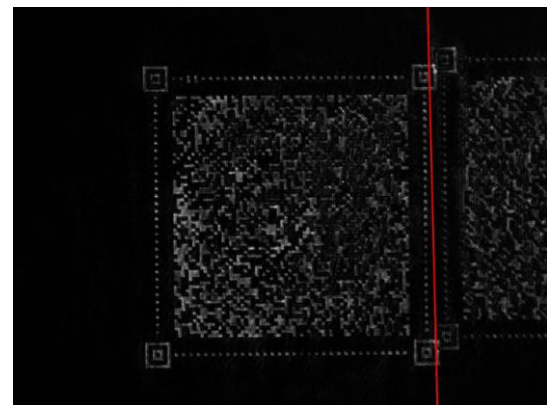


Fig. 2: Imagen de la reconstrucción de una página de datos, donde se observa la sombra de la página adyacente.

En la figura 2 se observa la imagen capturada al reconstruir una página de datos, donde se presenta la imagen completa captada por el CCD. Se puede apreciar como aparece la página adyacente cuando se graba con una diferencia de 1° en la rotación del espejo. La línea roja muestra donde acaba una imagen y empieza la siguiente, si bien a veces se observa esta doble imagen, hay suficiente separación para realizar el análisis de los datos. Por eso limitamos el número de páginas a grabar a 9, la imagen central y un giro total de 4° en cada dirección.

En trabajos anteriores hemos explorado distintos tipos de modulación a aplicar en la página de datos, para estudiar los límites a los que nos enfrentamos. Aquí hemos seleccionado la modulación binaria de intensidad (BIM-Binary Intensity Modulation), por su sencillez a la hora de detectar y porque es la más exigente en cuanto a rango dinámico consumido [8,11] por la presencia de un importante término DC, cuestión que nos interesa analizar en nuestro material.

4. Resultados

Para obtener los primeros resultados de reconstrucción de páginas de datos multiplexadas angularmente hay que tener en cuenta algunas consideraciones de investigaciones realizadas por el grupo previamente.

El material utilizado es un fotopolímero compuesto de Acrilamida (AA) como monómero polimerizable, trietanolamina (TEA) como generador de radicales, y N,N' metilen-bis-acrilamida (BMA) como entrecruzante, eosina amarillenta (YE) como colorante y polivinilalcohol (PVA) como aglutinante. Sobre este fotopolímero se han realizado en nuestro grupo muchos estudios, por ello tenemos cierto conocimiento previo que nos facilitará la selección de algunos parámetros. El primero de todos es la relación de potencia de los haces: resultados previos nos indican una relación de haces en el plano de registro de 1:400, más concretamente la potencia del haz de referencia la ajustamos a 2mW y el haz objeto se ajusta a $5\mu\text{W}$. Aunque lo importante es la relación de haces, se han escogido potencias bajas ya que vamos a

impresionar varias veces el fotopolímero en la misma posición [8].

Con respecto al tiempo de exposición trabajos previos nos permiten ajustar el tiempo de exposición en este tipo de fotopolímero, donde se ha llegado a ajustar los tiempos para grabar hasta 60 hologramas [12]. En nuestro caso el grosor de la película de fotopolímero es menor, trabajamos con muestras de $90\pm 2\mu\text{m}$ de espesor, y se van a almacenar un número menor de hologramas.

Basados en dicho conocimiento vemos cómo hay que ajustar los tiempos con una cierta progresión para que los hologramas se reconstruyan con la misma intensidad. Una medida sencilla de esta intensidad se puede obtener de medir el valor medio de la imagen captada por la CCD, para ello realizamos la media de los valores de cada pixel.

Este valor medio nos servirá para tener una primera referencia sobre la energía depositada para cada página de datos, de manera que nos permite estimar si estamos llegando o no a la saturación del material.

Tabla 1: Tiempos de exposición durante el registro, y valor medio captado por el CCD durante la reconstrucción.

Áng.	Toma 1		Toma 2	
	T (s)	Media	T(s)	Media
-4°	1.9	683	2.9	694
-3°	1.7	750	2.7	769
-2°	1.5	798	2.5	817
-1°	1.5	762	2.5	850
0°	1.9	888	2.9	1265
1°	1.3	763	2.3	1094
2°	1.9	1138	2.7	1222
3°	1.5	778	2.5	980
4°	1.5	707	2.5	788

En la tabla 1 podemos observar el valor medio del nivel de gris de la imagen obtenida, para cada ángulo de reconstrucción y tiempo de exposición usado. Se han incluido dos tomas de datos diferentes con distintos tiempos para poder comparar resultados. En este contexto, cuando hablamos de nivel de gris hay que tener en cuenta que nuestra cámara tiene un rango dinámico de 14 bits, lo que

supone un valor máximo de nivel de gris de 16384, esta es la razón de que los valores de la media sean mayores de 256 (que sería el máximo nivel de gris en una imagen). Este valor nos da una idea de la luminosidad captada por el CCD.

Con respecto a los tiempos de exposición hay que tener en cuenta cómo se han tomado los datos, las páginas de datos se han grabado comenzando siempre en el ángulo inicial (0°), después se va girando en saltos de 1° en el sentido que se ha considerado positivo hasta 4° (5 páginas), una vez finalizada la grabación de la 5ª página de datos, se gira el espejo rotante en el sentido contrario, pero saltando esos 4° , es decir, se gira hasta el punto de comienzo y se va girando en el sentido contrario a saltos de 1° , para grabar las páginas de datos correspondientes a los ángulos reflejados en la tabla 1 de -1° a -4° , teniendo finalmente 9 páginas de datos almacenadas en cada posición.

Las dos tomas reflejadas en la tabla 1 han sido tomadas con las mismas condiciones de tiempo de integración, 54.750ms, en la cámara CCD. Esta exposición se escoge en cada experimento de forma que nos aseguremos que en la imagen capturada no se produce saturación en el nivel de gris, y se obtenga una imagen reconocible para que después en el análisis bit a bit sea susceptible de obtener un buen nivel de errores de bit (VER). La toma 2 se ha realizado con una relación de tiempos entre los distintos ángulos similar, pero aumentando el tiempo total de cada página en un segundo, para darle una mayor visibilidad a las páginas en las mismas condiciones, y se observa como en principio para los primeros ángulos almacenados se aumenta la luminosidad aparente de las páginas, pero para las últimas tomas, debido a la saturación del material vemos como la luminosidad es similar a la de la toma 1, que está realizada con tiempos menores.

5.- Conclusiones

En este trabajo hemos presentado un método sencillo para poner a punto y seleccionar la potencia empleada y los tiempos de exposición, para llevar a cabo la multiplexación

angular sobre el material basado en PVA/AA. Con esta medida rápida del valor medio de nivel de gris captado en el sensor CCD tenemos información sobre la reconstrucción que obtenemos de cada página, y si estamos llegando a la saturación del material. De esta forma comprobamos la puesta a punto del sistema de multiplexación angular y las limitaciones a las que nos enfrentamos. Podemos multiplexar hasta 9 páginas de datos y nos hemos asegurado que el material no llega a saturarse obteniendo imágenes de suficiente calidad para posteriormente realizar un análisis más acorde al sistema que estamos utilizando como sería comparar el nivel BER obtenido para cada página de datos y comparar con los resultados obtenidos cuando se utiliza todo el rango dinámico para una página de datos [8].

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades con los proyectos FIS2017-82919-R (MINECO/AEI/FEDER, UE) y FIS2015-66570-P (MINECO/FEDER) por la Generalitat Valenciana con el proyecto CDEIGENT/2018/024 y la Universidad de Alicante con el proyecto GRE17-06.

Referencias

- [1] P. J. VAN HEERDEN, "Theory of optical information storage in solids", *Appl. Opt.*, 2(4), 393-400, 1963.
- [2] D. SARID, B.H. SCHECHTMAN, "A roadmap for data storage applications", *Opt. Photonics News*, 18(5), 32-37, 2007.
- [3] H. J. COUFAL, D. PSALTIS, B. T. SINCERBOX, eds. "Holographic Data Storage", (Springer-Verlag, 2000).
- [4] K. CURTIS, L. DHAR, A. HILL, W. WILSON, M. AYRES, "Holographic Data Storage: From theory to Practical Systems", (John Wiley & Sons, Ltd., 2010).
- [5] G. T. SINCERBOX, "History and physical principles", in *Holographic Data Storage*, (Springer-Verlag, pp. 3-20, 2000).
- [6] K.-I. SHIMADA, T. IDE, T. SHIMANO, K. ANDERSON, K. CURTIS, "New optical architecture for holographic data storage system compatible with Blu-ray Disc™ system" *Opt. Eng.* 53(2), 025102, 2014.
- [7] F. J. MARTÍNEZ, A. MÁRQUEZ, S. GALLEGU, M. ORTUÑO, J. FRANCÉS, I.

- PASCUAL, A. BELÉNDEZ, “*Predictive capability of average Stokes polarimetry for simulation of phase multilevel elements onto LCoS devices.*”, Appl. Opt. 54(6), 1379-1386, 2015.
- [8] F. J. MARTÍNEZ, R. FERNÁNDEZ, A. MÁRQUEZ, S. GALLEGO, M.L. ÁLVAREZ, I. PASCUAL, A. BELÉNDEZ, “*Exploring binary and ternary modulations on a PA-LCoS device for holographic data storage in a PVA/AA photopolymer.*”, Opt. Express, 23(16), 20459-20479, 2015.
- [9] J. JOSEPH, D. A. WALDMAN, “*Homogenized Fourier transform holographic data storage using phase spatial light modulators and methods for recovery of data from the phase image.*” Appl. Opt., 45(25), 6374-6380, 2006.
- [10] A. VANDERLUGT, “*Optical Signal Processing*”, (John Wiley & Sons, 1992).
- [11] B. DAS, J. JOSEPH, K. SINGH, “*Phase modulated gray-scale data pages for digital holographic data storage.*”, Opt. Commun., 282(11), 2147-2154, 2009.
- [12] E. FERNÁNDEZ, C. GARCÍA, I. PASCUAL, M. ORTUÑO, S. GALLEGO, A. BELÉNDEZ, “*Optimization of a thick polyvinyl alcohol-acrylamide photopolymer for data storage using a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing.*” Appl. Optics, 45(29), 7661-7666, 2006.